

Modelo de elevación digital de alta resolución para identificar y evaluar zonas en riesgo de inundación: caso caña de azúcar

High resolution digital elevation model to identify and evaluate areas at risk of flooding: case sugarcane

Luis Euseppe Ortiz Saenz¹

Para citar este artículo: Ortiz-Saens, L.E. (2019). Modelo de elevación digital de alta resolución para identificar y evaluar zonas en riesgo de inundación: caso caña de azúcar. *UD y la Geomática*, (14), 18-25

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448407.15266>

Fecha de recepción: 24 de agosto de 2019

Fecha de aceptación: 04 de diciembre de 2019

RESUMEN

Un modelo de elevación digital (DEM) es una representación numérica de la superficie de la Tierra desnuda, generado a partir de diferentes fuentes. Desde vehículos aéreos no tripulados (UAV), se han obtenido DEM de alta resolución espacial como herramienta precisa y de bajo costo para recoger información de la superficie. Sin embargo, en agricultura los estudios de la superficie tradicionalmente son enfocados al análisis de suelos para manejo y conservación, mientras que los efectos por el cambio climático que alteran la distribución e intensidad de la precipitación ocasionan inundaciones. Esta consecuencia es relevante por el impacto que ha tenido en las áreas sembradas en caña de azúcar en el Valle del Cauca. Por esta razón, este trabajo se centra en identificar y evaluar el área en riesgo de inundación de una hacienda sembrada en caña de azúcar, utilizando un DEM de alta resolución, un modelo de lluvia-escorrentía y dos *software*: *HEC-RAS* y *ArcGIS*. Teniendo en cuenta información pluviométrica de una estación meteorológica, se elaboró la curva de intensidad-duración-frecuencia (IDF) para un periodo de retorno de 25 años. Como resultado, 2,6 hectáreas están en alto riesgo de inundación con láminas que pueden llegar a un metro de altura.

Palabras clave: DEM, UAV, caña de azúcar, *HEC-RAS*, *ArcGIS*.

ABSTRACT

A digital elevation model (DEM) is a numerical representation of the surface of the bare earth, generated from different sources. From unmanned aerial vehicles (UAV), high spatial resolution DEM have been obtained as an accurate and low cost tool to obtain surface information. However, in agriculture, surface studies are traditionally focused on the analysis of soils for management and conservation, while the effects of climate change that alter the distribution and intensity of precipitation cause flooding. This is a relevant consequence of the impact it has had on the areas planted in sugarcane in the Valle del Cauca. Therefore, this work focuses on identifying and evaluating the area at risk of flooding of an estate planted in sugarcane, using a high-resolution DEM, a rain-runoff model and two software: *HEC-RAS* and *ArcGIS*. Based on rainfall information from a meteorological station, the intensity-duration-frequency curve (IDF) was prepared for a return period of 25 years. Obtaining as a result that 2.6 ha are at high risk of flooding with sheets that can reach 1 m in height.

Keywords: DEM, UAV, sugarcane, *HEC-RAS*, *ArcGIS*.

1 Ingeniero agrónomo. AGRO AP, Cali, Colombia. leortiz@unal.edu.co

Introducción

Un modelo de elevación digital (DEM, por su sigla en inglés) es una representación numérica de la superficie de la Tierra desnuda (Hawker *et al.*, 2018). En la cual, se pueden realizar representaciones tridimensionales debido a un conjunto de datos con coordenadas de latitud, longitud y altitud, asociado a un sistema de georreferenciación conocido (Carretero, 2015).

Los DEM se pueden derivar de varias fuentes, por ejemplo, mediante mapas de curvas de nivel, sensores remotos, tecnología de detección de luz y rango (LiDAR, por su sigla en inglés), restitución fotogramétrica y, más recientemente, estructura desde el movimiento (SfM, por su sigla en inglés) (López y Álvarez, 2018a).

Cada fuente proporciona un DEM con diferentes precisiones y resoluciones espaciales que, utilizado como entrada topográfica para modelos hidráulicos, puede dar lugar a diferencias cuantitativas en los resultados. No obstante, el empleo de fuentes de baja resolución espacial (SRTM o ASTER) es limitado, dirigido a estudios de gran envergadura (Casas, Benito, Thorndycraft y Rico, 2006; Rodríguez, 2013; Yan, Di Baldassarre y Solomatine, 2013; Ali, Solomatine y Di Baldassarre, 2015) mientras que fuentes de alta resolución y precisión (LiDAR) se ven afectadas por el alto costo, debido a la necesidad de aviones o helicópteros para llevar el equipo, lo que no siempre justifica su uso (Reali, 2018).

Por tal motivo, la implementación de vehículos aéreos no tripulados (UAV, por su sigla en inglés) en el proceso de captura de información de la superficie del suelo se ha constituido como una herramienta precisa, de bajo costo de implementación, fácil de operar, de acceso a zonas difíciles y alta resolución espacial (Coral, 2015; García y Herrera, 2015). Esto permite que detalles inherentes a los datos terrestres de muy alta resolución (10 cm) sean valiosos cuando se ejecutan modelos de superficie y se analizan zonas en riesgo de inundación en pequeñas áreas (Sampson *et al.*, 2012; López y Álvarez, 2018).

Tradicionalmente en agricultura, los estudios de la superficie son enfocados al análisis de suelos, siendo la fuente más importante para el manejo y conservación (Munar, 2010).

Sin embargo, en la agricultura el recurso hídrico es un factor indispensable para la producción, condicionado por la oferta de cada región. Para el Valle del Cauca, la distribución de las lluvias responde a un régimen bimodal, cuyas temporadas lluviosas se acentúan en los meses de marzo a mayo, y septiembre a noviembre (Guzmán, Ruíz y Cadena, 2014). Aunque en las últimas décadas, se han presentado distorsiones en la distribución de las lluvias, influenciadas por dos fenómenos de cambio climático: 1) El Niño, que se caracteriza por la disminución de la precipitación y el número de días con esta, y 2) La Niña, cuando aumenta la precipitación y el número de días con esta (Cortés, 2010).

Dicho de otra manera, las condiciones de riesgo se presentan con el aumento de la precipitación. Así, para el periodo transcurrido entre 2010 y 2011, el área afectada por inundación superó las 30 000 ha sembradas en caña de azúcar en el departamento (Cenicafía, 2016).

Medidas de prevención para el sector azucarero han sido generadas por Cenicafía (2016), con el objetivo de fortalecer las prácticas culturales preventivas como elaboración de diques, adecuación de los canales de drenajes, entre otras. Sin embargo, estudios direccionados a las particularidades de cada finca o hacienda pueden ser aplicados a partir de los registros históricos de precipitación de la zona, implementando modelos de lluvia-escorrentía. Estos últimos calculan el caudal máximo instantáneo de escorrentía superficial sobre un área de interés, integrando características específicas geométricas, de suelos, vegetación, entre otras. Es importante resaltar que la escogencia de un método u otro se centra en el área de estudio, y para áreas inferiores a 250 ha, se recomienda el método racional (Invías, 2009).

Para cuencas hidrográficas se han desarrollado softwares con el fin de evaluar el comportamiento del agua en la superficie. Uno de los más importantes es *HEC-RAS*. Un programa de libre acceso desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE. UU., capaz de realizar simulaciones de flujos de cauces naturales o artificiales en una dimensión, en movimiento estable, variado o gradualmente variado, lo cual facilita análisis de inundabilidad (Brunner, 2016).

Por tanto, el objetivo de este estudio se centra en identificar y evaluar el área en riesgo de inundación de una hacienda sembrada en caña de azúcar, mediante un DEM de alta resolución, apoyado en modelos de lluvia-escorrentía y dos programas: *HEC-RAS* y *ArcGIS* para dilucidar el comportamiento del agua en la superficie.

Metodología

Este estudio se llevó a cabo en una hacienda de 206 ha, ubicada en el corregimiento de Guanabanal, municipio de Palmira, departamento del Valle del Cauca, Colombia (3°27'22"N 76°25'43"O). La captura de datos y procesamiento de la información de la hacienda estuvo a cargo de la empresa ANKA Robótica Aérea, a mediados de febrero de 2017. El recorrido de la hacienda se realizó empleando un UAV de ala fija a 150 m de altura, con una cámara óptica comercial de 24 Mpx y escenas con el 80 % de solape. La generación del DEM se hizo por fotogrametría basado en puntos de control con sistema de proyección Magna Sirgas Bogotá, logrando 0,19 m en la resolución espacial (figura 1).

Con información pluviométrica entre 1973 y 2016, de la estación meteorológica del Ideam más cercana (aeropuerto Alfonso Bonilla: 26075040), se determinó la curva de intensidad-duración-frecuencia (IDF) por el método

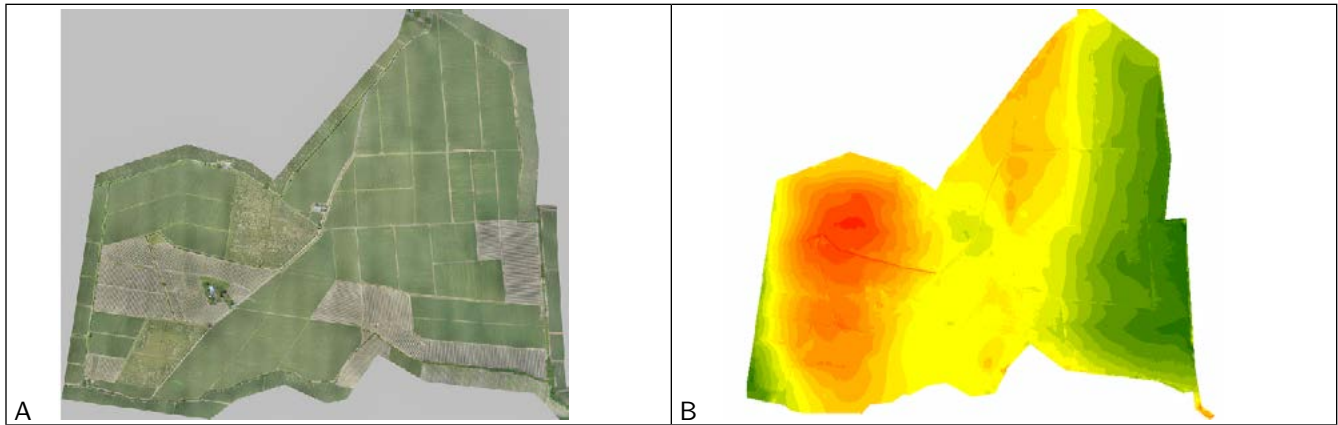


Figura 1. Zona de estudio. (A) Fotografía aérea. (B) MDE representado en escala de rojo a verde con rangos de 0,50 m, donde la tonalidad de rojo intenso indica las zonas más bajas, mientras que, los verdes más intensos son las zonas más altas

Fuente:

simplificado para Colombia (ecuación (1)), adaptado a los datos de precipitación máxima promedio multianual en 24 h, desarrollado por Vargas y Díaz (1998). Como criterio de seguridad, se estableció un periodo de retorno de 25 años (riesgo de presentar un evento de precipitación pico igual o superior en el periodo determinado).

$$Q=0.278 \cdot C \cdot I \cdot A \quad (1)$$

Dónde: i es la intensidad de precipitación en mm h^{-1} ; T es el periodo de retorno en años; M es la precipitación máxima promedio multianual en 24 h a nivel multianual; t es la duración de la lluvia en min; a , b , c y d son los parámetros de ajuste según las regiones de Colombia, para este caso $a=0,94$, $b=0,18$, $c=0,66$ y $d=0,83$.

Así, para la hacienda, el comportamiento de la curva IDF responde a un decrecimiento exponencial, donde la magnitud de la intensidad de la lluvia (mm h^{-1}) depende del tiempo de concentración (min) (figura 2).

Para el caso del método racional, se calculó el caudal máximo instantáneo por escorrentía superficial para el mismo periodo de retorno, aplicando la ecuación (2):

$$Q=0.278 \cdot C \cdot I \cdot A \quad (2)$$

Donde, Q es el caudal en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; C , el coeficiente de escorrentía adimensional; I , la intensidad de la precipitación en mm h^{-1} , y A , el área aferente en km^2 .

De acuerdo con el coeficiente C , este varía a través del tiempo de duración de la precipitación, en función de las

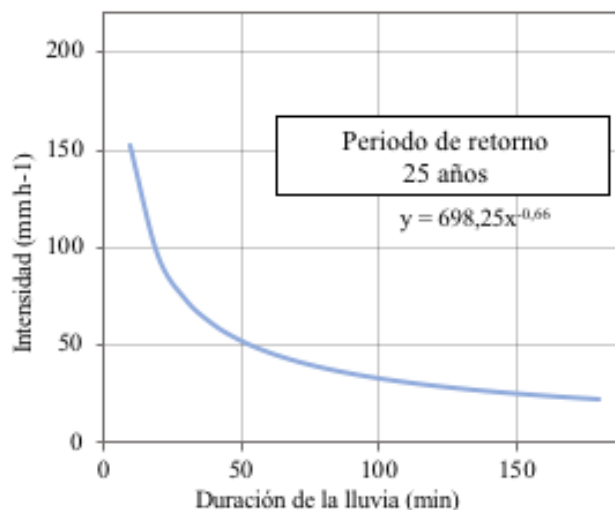


Figura 2. Comportamiento de la curva IDF

Fuente:

características del terreno, tipo de suelo, vegetación, permeabilidad y humedad antecedente. Por lo que, durante una precipitación, la infiltración disminuye y consecuentemente aumenta el valor de C. Sin embargo, para fines de simplicidad del método, los valores de C se consideran constantes durante las lluvias, tomando valores como se establece en la tabla 1. Así, el C=0,50 es el utilizado para este estudio.

Tabla 1. Valores del coeficiente de escorrentía (C) en áreas rurales.

| Vegetación y topografía | Textura del suelo | | |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|-----------|
| | Franco arenoso | Franco limo arcilloso | Arcilloso |
| Bosques | | | |
| Plano | 0,1 | 0,3 | 0,4 |
| Ondulado | 0,25 | 0,35 | 0,5 |
| Montañoso | 0,3 | 0,5 | 0,6 |
| Pastos | | | |
| Plano | 0,1 | 0,3 | 0,4 |
| Ondulado | 0,16 | 0,36 | 0,55 |
| Montañoso | 0,22 | 0,42 | 0,6 |
| Tierras cultivadas | | | |
| Plano | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| Ondulado | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| Montañoso | 0,52 | 0,72 | 0,82 |

Nota: plano (pendiente 0-5 %), ondulado (pendiente 5-10 %), montañoso (pendiente 10-30 %). Para valores mayores al 30 %, a falta de datos, utilizar los valores para pendientes entre el 10 % y el 30 %.

Fuente:

Para fines prácticos, la hacienda se subdividió en cuatro grupos, según el orden de descarga hasta el colector principal y se calculó el caudal aportado por cada grupo (figura 3).

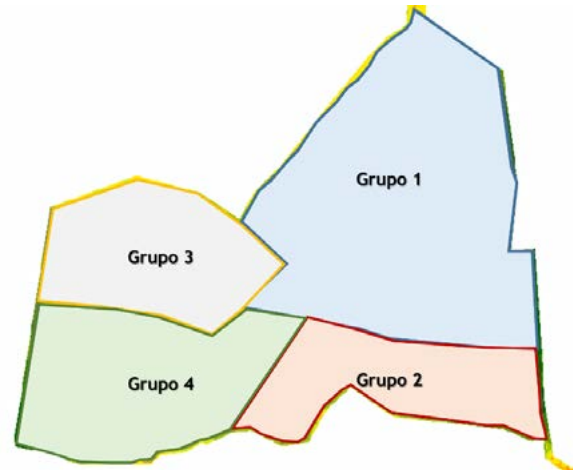


Figura 3. División geográfica de la hacienda en grupos según el orden de descarga al colector principal

Fuente:

Se estableció el recorrido de la precipitación para concentrarse desde el punto más retirado de la hacienda hasta la zona más baja (tiempo de concentración, T_c), basado en la longitud máxima (L) y la pendiente (S) del trayecto, teniendo en cuenta las ecuaciones de la tabla 2:

Tabla 2. Ecuaciones de tiempo de concentración

| Autor | Ecuación | Descripción | |
|-------------------|---|-------------|---|
| Témez | $T_c = 0.30 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76}$ | Donde: | T_c : en horas (h) L: en kilómetros (km) S: en porcentaje (%) |
| Kirpich | $T_c = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$ | Donde: | T_c : en horas (h) L: en kilómetros (km) S: en metro por metro (m/m) |
| Johnstone y Cross | $T_c = 2.6 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.5}$ | Donde: | T_c : en horas (h) L: en kilómetros (Km) S: en metro por kilómetro (m/Km) |
| V.T. Chow | $T_c = 0.273 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.64}$ | Donde: | T_c : en horas (h) L: en kilómetros (Km) S: en metro por metro (m/m) |
| Hathaway | $T_c = \frac{36.36(L n)^{0.467}}{S^{0.234}}$ | Donde: | T_c : en horas (min) L: en kilómetros (km) S: en metro por metro (m/m) n: factor de rugosidad (0,20, suelo pobre de hierba, con cosecha en hileras o moderadamente rugosa y desnudo), adimensional |

Fuente:

Para evaluar la capacidad hidráulica del colector principal, se siguió el procedimiento descrito por Molero (2013), integrando la extensión “HEC-GeoRAS 10” en ArcGIS 10.3. Se crearon las características del colector, incluyendo la geometría del terreno y secciones transversales cada 5 m de ancho variables (figura 4), para posteriormente ser exportadas y modeladas en el software HEC-RAS 5.0.3. Adicionalmente, se extrajeron 9 secciones: 3 al inicio, 3 al medio y 3 al final para identificar la sección hidráulica.



Figura 4. Secciones transversales (líneas verdes) generadas sobre el colector principal (línea azul) de la hacienda

Fuente:

Para simular el comportamiento del caudal en la superficie del terreno, se tuvo en cuenta la pendiente promedio del colector y el coeficiente de rugosidad (n) basado en la tabla 3. Este último valor se asocia a las características del cauce en respuesta a factores de: rugosidad superficial, vegetación, irregularidades del canal, la alineación de canal, cambios estacionales, temperaturas, material suspendido y carga del fondo del lecho (Brunner, 2016). Para este estudio se ingresaron valores n iguales a 0,035.

Tabla 3. Coeficientes de rugosidad n de Manning para canales sin revestir

| Descripción | n |
|---|-------------|
| En tierra ordinaria, superficie uniforme y lisa | 0,020–0,025 |
| En tierra ordinaria, superficie irregular | 0,025–0,035 |
| En tierra con ligera vegetación | 0,035–0,045 |
| En tierra con vegetación espesa | 0,040–0,050 |
| En tierra excavada mecánicamente | 0,028–0,033 |
| En roca, superficie uniforme y lisa | 0,030–0,035 |
| En roca, superficie con aristas e irregularidades | 0,035–0,045 |

Realizada la modelación en el HEC-RAS, la información fue exportada al ArcGIS, y a partir de allí se calculó el área en riesgo de inundación y el volumen de agua en la zona de inundación. Consecutivamente y teniendo en cuenta que en la zona más baja de la hacienda existe una estación de bombeo, se calculó el volumen y el tiempo de bombeo para una motobomba con capacidad para manejar 80 l s^{-1} .

Resultados

De acuerdo con la metodología empleada, al final del colector principal se presenta un caudal acumulado de $9,45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Siendo el mayor aportante generado por el grupo 1, con un caudal de $3,90 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, debido a la relación directa con el área aferente, seguido del grupo 4, 3 y 2, con caudales de 2,01; 1,86 y 1,68, respectivamente (tabla 4).

De acuerdo con las secciones transversales del colector generadas sobre el DEM, se identifican grandes irregularidades en la geometría y la profundidad (figura 5). Esto indica profundidades que varían desde 0,3 m a 1,50 m y anchos desde 3,9 m hasta 6,6 m. No obstante, cabe resaltar que la sección existente del canal es de geometría de trapecio.

Tabla 4. Cálculo de caudales máximos para la hacienda, fraccionado en grupos según el orden de descarga al canal principal

| | Área (ha) | L (m) | S (m m^{-1}) | T_c medio (min) | Intensidad (mm h^{-1}) | C | Q ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) | |
|---------|-----------|---------|---------------------------|-------------------|-----------------------------------|------|-------------------------------------|------|
| Grupo 1 | 87,4 | 1127,1 | 0,001 | 106,32 | 32,10 | 0,50 | 3,90 | |
| Grupo 2 | 24,2 | 607,9 | 0,004 | 54,24 | 50,04 | | 1,68 | |
| Grupo 3 | 35,8 | 1218,2 | 0,003 | 84,18 | 37,44 | | 1,86 | |
| Grupo 4 | 45,2 | 2164,9 | 0,004 | 106,97 | 31,97 | | 2,01 | |
| Total | | | | | | | | 9,45 |

Fuente:

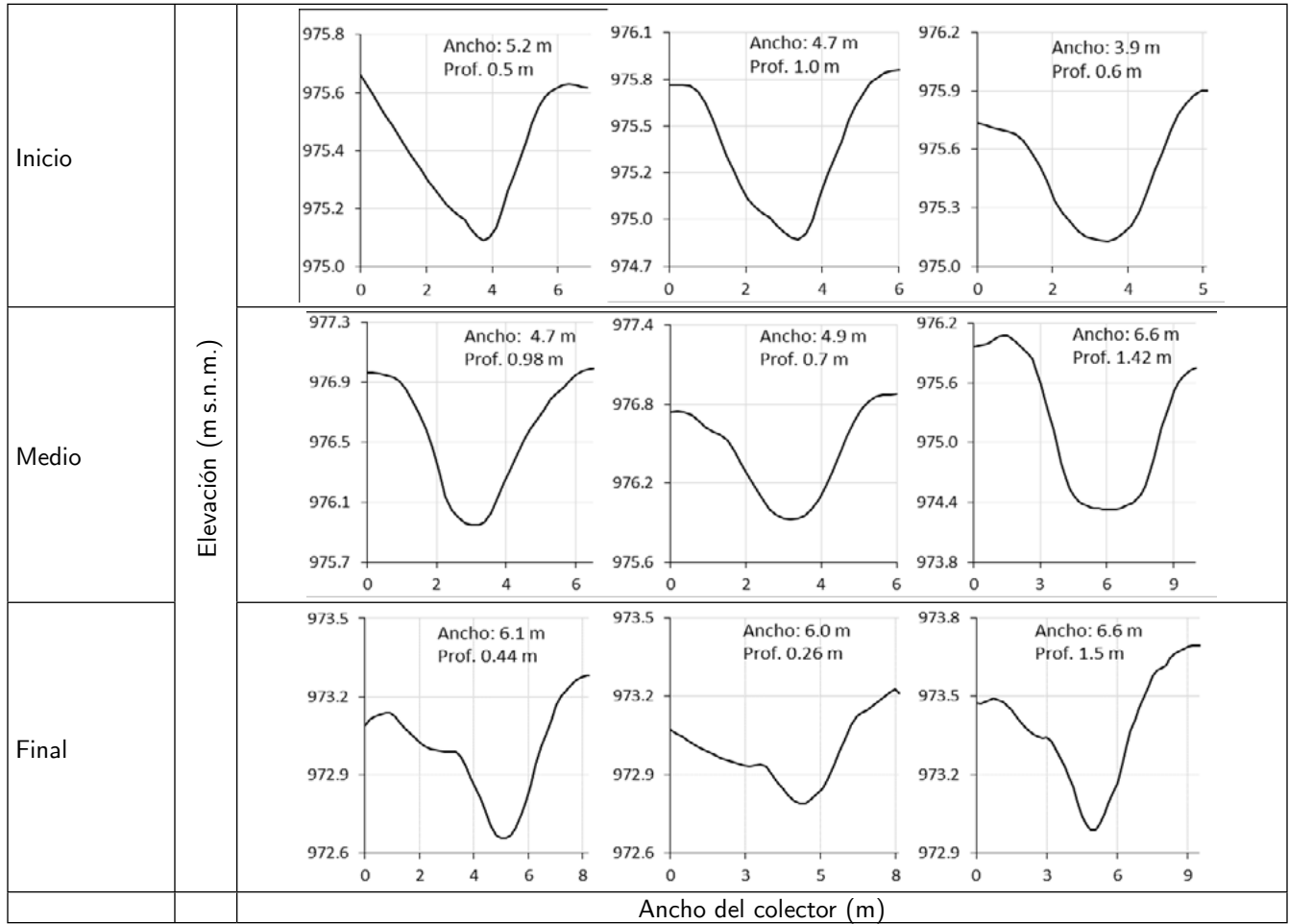


Figura 5. Forma geométrica del colector principal de acuerdo a la ubicación, parte inicial, media o final

Fuente:

Basado en la modelación en el programa *HEC-RAS*, la capacidad hidráulica del colector se ve comprometida en la parte final (210 m antes de la estación de bombeo). Es

predominante el desbordamiento de agua al costado izquierdo del colector, aunque en menor medida, también se presentan desbordamientos al costado derecho (figura 6).

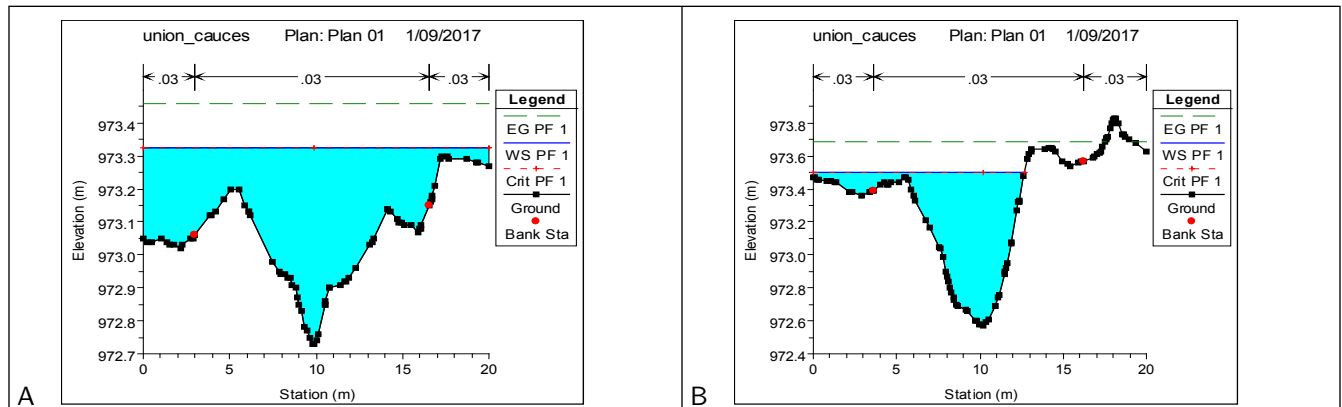


Figura 6. Comportamiento del agua en la sección transversal al final del colector principal. (A) 120 m antes de la estación de bombeo. (B) 210 m de la estación de bombeo. Para ambos casos hay desbordamiento del agua, acentuándose la condición a medida que se acerca al final del canal

Fuente:

Acorde con el comportamiento hidráulico de las secciones, la zona más baja de la hacienda donde finaliza el canal colector principal, se presenta un área de 2,6 ha con el mayor riesgo de inundación, como se demarca en la figura 7. Este resultado concuerda con experiencias anteriores, presentadas en la hacienda con el manejo del agua en eventos La Niña.

No obstante, bajo todos los escenarios modelados, en la zona se acumulan 47 000 m³. Por lo que, para una moto-bomba con las características mencionadas anteriormente, el tiempo de bombeo estimado es de 7 días.

Discusión de resultados

La mayor limitante para emplear un DEM generado por fotogrametría se centra en la precisión del terreno por la interferencia que ocasiona la vegetación densa y los cuerpos de agua, como se evidencia en las secciones transversales. Implementar levantamientos con tecnología LiDAR genera modelos más precisos (Casas *et al.*, 2006). Sin embargo, DEM generados con tecnología LiDAR en proyectos de gran envergadura, para simulaciones de inundación, no aportaron ninguna mejora sustancial que justificara su implementación (Rodríguez, 2013).

Estudios realizados por López y Álvarez (2018b) indican que la resolución del DEM influye en las propiedades de pendiente, rugosidad y área, tenidas en cuenta para este estudio. Además, de acuerdo con el tipo de cobertura vegetal, se presentan patrones adecuados del terreno que tienen efecto en las simulaciones de características hidrológicas.

No obstante, modificar la sección hidráulica del canal colector repercute en el área de inundación. Por tanto, es

viable generar nuevas modelaciones considerando la capacidad real del canal y ampliando el ancho de las secciones sobre el área de influencia.

Si bien, por experiencias pasadas, ya se había identificado dicha zona con alto riesgo de inundación, evaluaciones fundamentadas en herramientas tecnológicas cumplen un papel importante en la prevención o estudios de viabilidad de aptitud del suelo, como se ha integrado en otras regiones del país con experiencias en frutales (Munar, 2010).

En ese sentido, la necesidad actual de integrar profesionales del sector agrario en apoyarse en técnicas de teledetección para validar los conocimientos de campo, podría llegar a soluciones inmediatas de mayor precisión en estudios requeridos para el cultivo (González, 2006).

Conclusiones

De acuerdo con este estudio, 2,6 ha están en alto riesgo de inundación con láminas de agua que pueden llegar a 1 m de altura, ocasionando que en la parte baja de la hacienda se acumulen 47 000 m³. Dicha área corrobora experiencias anteriores de inundaciones por efecto del fenómeno de La Niña en la región.

Agradecimientos

A la empresa AGRO AP por generar el espacio y buscar nuevas soluciones para la agricultura. Al talento humano de la empresa, los ingenieros Óscar Ochoa, Andrés Ibarra y Carlos Mosquera, al igual que la empresa ANKA por la disponibilidad de información.

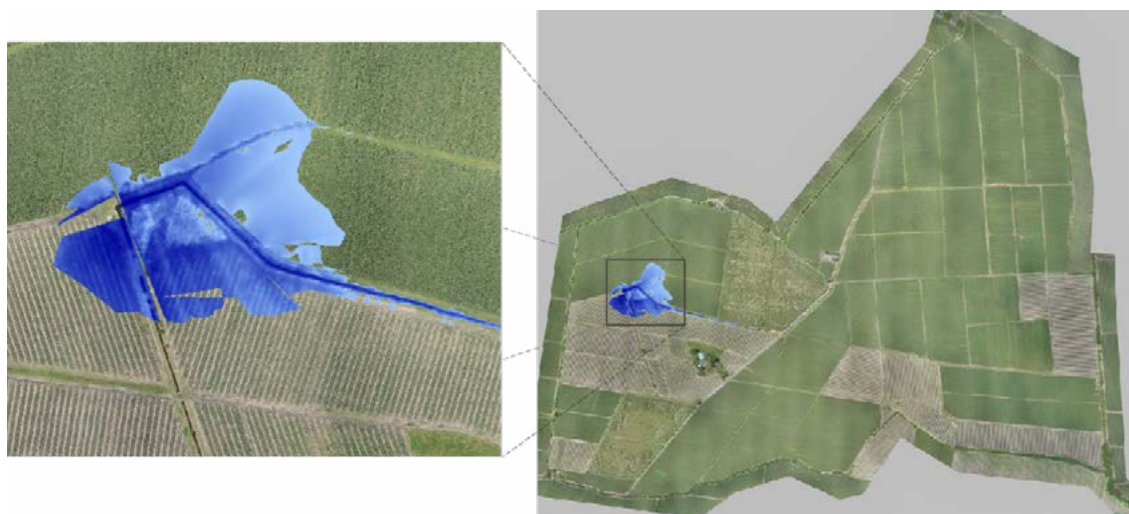


Figura 7. Identificación de zona en riesgo por inundación (2,6 ha). Las zonas en azul oscuro alcanzan profundidades de 1 m, mientras que, zonas en azul claro la lámina de agua es inferior a los 5 cm

Fuente:

Referencias bibliográficas

- Ali, A., Solomatine, D.P. y Di Baldassarre, G. (2015). Assessing the impact of different sources of topographic data on 1-D hydraulic modelling of floods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(1), 631-643. DOI: [org/10.5194/hess-19-631-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-631-2015)
- Brunner, G.W. (2016). *HEC-RAS, river analysis system. Hydraulic reference manual*. Versión 5. US Army Corps of Engineers & Hydrologic Engineering Center. Davis, CA.
- Carretero, S., S. (2015). Modelos digitales del terreno mediante fotogrametría aérea realizada con un vehículo aéreo no tripulado.
- Casas, A., Benito, G., Thorndycraft, V.R. y Rico, M. (2006). The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(4), 444-456. DOI: [org/10.1002/esp.1278](https://doi.org/10.1002/esp.1278)
- Cenicaña (2016). Niña: ¿estamos preparados? *Carta Informativa*, 4(2), XX-XX. Cali, Colombia.
- Cortés B., E. (2010). Incidencia de “El Niño” y “La Niña” en el clima del valle del río Cauca. *Carta Trimestral*, 3/4, XX-XX.
- García, C.E. y Herrera, F.A. (2015). Percepción remota en cultivos de caña de azúcar usando una cámara multi-espectral en vehículos aéreos no tripulados. En *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR)* (pp. 4450-4457). XXX.XXX.
- González, J. (2006). *Evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección. Extensión a escala regional: Acuífero 08.29 Mancha Oriental*. [Tesis de doctorado]. Universidad de Valencia. Valencia, España.
- Guzmán, D., Ruíz, J. y Cadena, M. (2014). *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través análisis de componentes principales (ACP)*. Bogotá: IDEAM.
- Hawker, L., Rougier, J., Neal, J., Bates, P., Archer, L. y Yamazaki, D. (2018). Implications of simulating global digital elevation models for flood inundation studies. *Water Resources Research*, 54(10), 7910-7928. DOI: [org/10.1029/2018WR023279](https://doi.org/10.1029/2018WR023279)
- Ideam (2016). *Suministro de información hidrometeorológica y ambiental*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>
- Invías (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Bogotá: Ministerio de Transporte.
- López, M. y Álvarez, S. (2018a) Influence of DEM resolution on modelling hydrological connectivity in a complex agricultural catchment with woody crops. *Earth Surf. Process. Landforms*, 43, 1403-1415. DOI: [10.1002/esp.4321](https://doi.org/10.1002/esp.4321).
- López, M., y Álvarez, S. (2018b). Influence of DEM source LiDAR and photogrammetry and resolution on computing topographic parameters in contrasted croplands.
- Molero, M.E. (2013). *Manual básico de HEC-GeoRAS 10*. 3a ed. [En línea]. España: Universidad de Granada.
- Munar V., O. (2010). *Determinación del potencial de los modelos digitales de elevación como fuente de datos para la evaluación de la aptitud de las tierras. Caso del cultivo de mango*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Reali, A. (2018). *Potentialities of unmanned aerial vehicles in hydraulic modelling drone remote sensing through photogrammetry for 1D flow numerical modelling*. [MSc tesis]. KTH Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.
- Rodríguez R., O. (2013). LiDAR vs. fotogrametría en la obtención de modelos digitales de elevación para estudios hidrológicos.
- Sampson, C.C., Fewtrell, T.J., Duncan, A., Shaad, K., Horritt, M.S. y Bates, P.D. (2012). Use of terrestrial laser scanning data to drive decimetric resolution urban inundation models. *Advances in Water Resources*, 41, 1-17. DOI: [org/10.1016/j.advwatres.2012.02.010](https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.010)
- Vargas M.R. y Díaz O.M. (1998). *Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad-duración-frecuencia para Colombia*. Bogotá: Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de los Andes.
- Yan, K., Di Baldassarre, G. y Solomatine, D. P. (2013). Exploring the potential of SRTM topographic data for flood inundation modelling under uncertainty. *Journal of Hydroinformatics*, 15(3), 849-861. DOI: [org/10.2166/hydro.2013.137](https://doi.org/10.2166/hydro.2013.137)

